

**БЫЧКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ  
ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ  
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика  
и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы», г. Екатеринбург.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Сарапулов Федор Никитич

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент  
Сокунов Борис Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Рубцов Виктор Петрович

кандидат технических наук, доцент  
Шутько Виктор Федорович

Ведущая организация: ЗАО «РЭЛТЕК»

Защита диссертации состоится 22 июня 2011 года в 14<sup>15</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по адресу: г.Екатеринбург, ул.Мира,19, ауд. Э -406.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, К-2, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан 20 мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.285.03  
д.т.н.



Зюзов А.М.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Применение электромагнитных перемешивателей металлов и сплавов в процессе кристаллизации позволяет решить ряд задач, относящихся к проблеме повышения качества, как полуфабриката, так и конечного продукта. Следует подчеркнуть, что свойства материала, его качество определяются не только кристаллической структурой, но и такими дефектами, как пористость, неметаллические включения, ликвация. Важно отметить, что макро- и микроструктура и дефекты, сформировавшиеся при литье заготовок, могут сохраняться в процессе дальнейшей технологической обработки материала.

Таким образом, целесообразно уже в процессе литья сформировать оптимальную, с точки зрения последующей технологической обработки, структуру, а также снизить дефектность материала по основным показателям: пористости, количеству неметаллических включений, неоднородности химического состава.

Работа электромагнитного перемешивателя основана на использовании комплекса электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, аналитическое исследование которых затруднено, а эксперименты являются дорогостоящими и длительными. Поэтому создание в предлагаемой работе универсальных методов компьютерного моделирования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в электромагнитных перемешивателях, позволяющих находить оптимальные конструкции и режимы их работы, является актуальной задачей.

**Объектом исследования является** специальная электрическая машина – электромагнитный перемешиватель, воздействующий электромагнитным полем на кристаллизующийся металл с целью получения рационального распределения температур и скоростей, обеспечивающих регламентированные параметры слитка.

**Предмет исследования:** электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы в современных устройствах, предназначенных для электромагнитного перемешивания расплавов.

**Цель работы:** создание компьютерных моделей для исследования электромагнитных, тепловых и гидромеханических процессов в электромагнитных перемешивателях и методик их проектирования, обеспечивающих совершенствование конструкций и режимов работы электромагнитных перемешивателей для цветных металлов и сплавов.

**Решаемые задачи:**

1. Анализ существующих электротехнологических установок, предназначенных для создания перемешивающего эффекта в кристаллизующемся металле и тенденций их развития.
2. Разработка математических и физических моделей для исследования электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в электромагнитных перемешивателях.
3. Разработка методик проектирования электромагнитных перемешивателей с заданными характеристиками.
4. Анализ различных модификаций устройств, предназначенных для электромагнитного перемешивания (ЭМП) и определение эффективности их применения.

5. Сравнительные исследования на математических и физических моделях электромагнитного воздействия на металлы.
6. Экспериментальная проверка разработанных методик проектирования на промышленных электромагнитных перемешивателях.
7. Выработка рекомендаций по выбору конструкций и режимам работы промышленных образцов устройств ЭМП.

**Методы исследования.** В работе используются методы теории цепей, конечных элементов, конечных разностей и эквивалентных тепловых схем замещения, а также эксперименты на физических моделях и промышленных образцах электромагнитных перемешивателей. Большинство из созданных компьютерных моделей реализованы при помощи пакетов COMSOL Multiphysics и MathCAD.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

В соответствии с формулой специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты», содержащей исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых устройств для преобразования электрической энергии, а также комплексные исследования научно-технических, производственных и технологических проблем, проводящихся с целью повышения технологичности преобразователей, в диссертации разработаны методы исследования специальной электрической машины – электромагнитного перемешивателя цветных металлов и сплавов. Научные результаты соответствуют пунктам 1,2,3,5 области исследования паспорта специальности 05.09.01:

1. Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электромеханических преобразователей энергии.
2. Разработка научных основ совершенствования электромеханических преобразователей.
3. Разработка моделей, методов анализа и синтеза преобразователей электрической энергии.
5. Разработка подходов, методов и алгоритмов, обеспечивающих проектирование электромеханических преобразователей.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

- методики расчёта характеристик, математические и физические модели электромагнитных, тепловых и гидромеханических процессов в рабочей зоне электромагнитных перемешивателей;
- результаты исследований электромагнитных перемешивателей цветных металлов и сплавов в процессе кристаллизации;
- рекомендации по конструктивному исполнению и выбору режимов работы электромагнитных перемешивателей цветных металлов и сплавов.

**Научную новизну** представляет разработанная универсальная компьютерная модель, позволяющая проводить исследования и проектирование электромагнитных перемешивателей с учетом взаимосвязей между тепловыми, электромагнитными и гидродинамическими процессами. Результаты исследований указанных процессов, рекомендации по проектированию промышленных устройств ЭМП и выбору энергоэффективных режимов их работы.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке компьютеризированной методики проектирования системы «электромагнитный перемешиватель – кристаллизатор – жидкая фаза металла – твердая фаза металла», а также в разработке рекомендаций по проектированию промышленных устройств ЭМП и выбору энергоэффективных режимов их работы.

### **Реализация**

1. В ОАО «Уралэлемент» (Челябинская область, г. Верхний Уфалей) были приняты и внедрены результаты исследования электромагнитных, тепловых и гидромеханических процессов в кристаллизующемся металле, методики расчёта устройства, предназначенного для ЭМП в процессе плавки и кристаллизации специальных сплавов в рабочем (закрытом) объеме электромагнитного перемешивателя.

2. Материалы диссертационной работы используются при создании процесса ЭМП сплавов МН0,6, МН2, МН6, МН10, МН18, МН19 в изложнице на предприятии ООО «Производственное объединение высокоточных сплавов и лигатур» (Курганская область, г. Далматово).

3. Результаты работы используются на кафедре «Электротехники и электротехнологических систем» УрФУ в учебном процессе, при курсовом и дипломном проектировании, проведении научных исследований и учебных лабораторных работ.

**Апробация.** Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных семинарах и конференциях:

- Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011». Екатеринбург. 2011;
- Научно-практические конференции с международным участием «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург. 2007, 2008, 2010;
- Всероссийская научная конференция молодых ученых. Новосибирск. 2009;
- IV научно-техническая конференция с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2009». Новосибирск. 2009;
- XII международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Крым, Алушта. 2008;
- III Международная НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург. 2007;
- «Всероссийская студенческая олимпиада, научно-практическая конференция и выставка студентов, аспирантов и молодых ученых». Екатеринбург. 2006;
- Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологий». Иваново. 2006;

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, 4 приложений. Общий объем 218 страниц. Основная часть изложена на 167 страницах машинописного тек-

ста, иллюстрирована 138 рисунками, 10 таблицами. Список использованной литературы содержит 107 наименований на 12 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена и обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цели работы и задачи, которые необходимо решить, отмечена научная новизна, практическая ценность результатов исследования, приведены структура диссертации и результаты апробации работы.

**В первой главе** отражены особенности специальных электрических машин - индукционных устройств, предназначенных для электромагнитного перемешивания расплавов. Приведен анализ отечественной и зарубежной литературы, а также периодических изданий, который показывает, что исследования электромагнитного воздействия на жидкие металлы, в частности, электромагнитного перемешивания в процессе кристаллизации, проводились как в нашей стране, так и за рубежом, однако считать задачу полностью решенной не представляется возможным. Показано, что ЭМП является альтернативой ряду металлургических способов воздействия на металлы с целью получения мелкокристаллической литой структуры слитка. Формулируется цель и обосновываются задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке компьютерных моделей устройств ЭМП, выполненных в пакете COMSOL Myltiphsysics. На рис.1. изображена схема взаимосвязанных расчётов электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в рабочей зоне электромагнитного перемешивателя.

При расчёте плоской линейной индукционной машины с восемнадцатью пазами решается электромагнитная задача в двумерной постановке для векторного магнитного потенциала (1). Решение задачи реализовано в пакете COMSOL Myltiphsysics с использованием модуля AC Power Electromagnetics.

$$\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} - \epsilon \mu \omega^2 \vec{A} + j \omega \vec{A} \sigma \mu = \mu \sigma \vec{v} \times \nabla \vec{A}, \quad (1)$$

где:  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\vec{v}$  – вектор скорости,  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\sigma$  – удельная электропроводность.

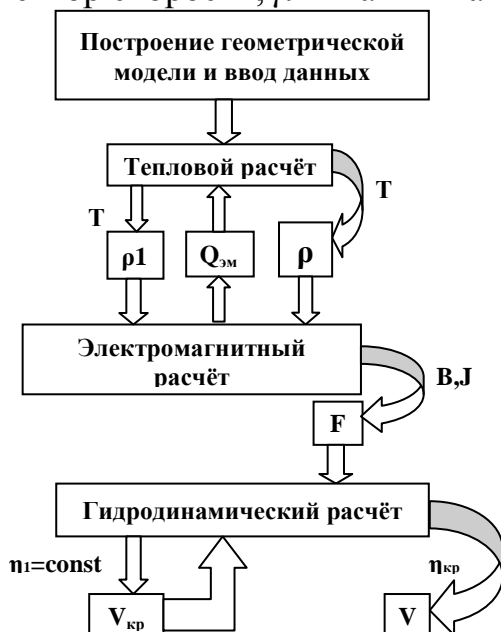


Рис. 1. Схема расчёта.

Выбор граничного условия ( $A = 0$ ) сделан на основании исследований, которые показали, что на расстоянии 0,46 м над поверхностью магнитопровода нормальная составляющая магнитной индукции равна 0,2% индукции на поверхность магнитопровода.

При расчете цилиндрических индукционных машин решалась электромагнитная задача в двумерной осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат (2).

Для расчета температурного поля был применён модуль «General Heat Transfer» в пакете Comsol Multiphsysics, при этом учитывается количество энергии, поступающей в кристаллизатор, и выделение тепловой энер-

гии с учётом скрытой теплоты плавления, затрачиваемой на переход металла из жидкого в твердое состояние ( $Q = G \cdot \lambda_{\text{ск}}$ , где:  $G$  - масса металла,  $\lambda_{\text{ск}}$  - скрытая теплота плавления).

$$\left(\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial z^2}\right) + \vec{A}(j\omega\sigma\mu - \varepsilon\mu\omega^2) = \mu\sigma\vec{v} \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial z}\right) \quad (2)$$

В основе математической модели тепловой задачи лежит уравнение теплопроводности:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v, \quad (4)$$

где:  $c$  - удельная теплоемкость;  $\rho$  - плотность вещества;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $q_v$  - удельное количество тепловой энергии внутренних источников энергии;  $T$  - температура.

В случае решения осесимметричной задачи в двумерной постановке уравнение (4) в цилиндрической системе можно записать как

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = q_v. \quad (5)$$

Введение в расчёт тепловой задачи позволило задавать электропроводности материалов в зависимости от температуры:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0(1+\alpha(T-T_0))}, \quad (6)$$

где:  $\sigma$  – электропроводность материала;  $\rho_0$  – удельное сопротивление при температуре, равной  $T_0$ ;  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления.

Расчёт поля скоростей производился с использованием модуля Incompressible Navier-Stokes в пакете Comsol Multiphysics, позволяющего решать переходные и стационарные процессы гидродинамики. В модели используется обобщенная версия уравнения Навье-Стокса, что позволило учесть переменную вязкость:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \nabla(\eta(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)) + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} + \nabla \vec{P} = \vec{F} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (8)$$

где:  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости;  $\rho$  – плотность;  $\vec{v}$  - вектор скорости;  $\vec{P}$  – давление;  $\vec{F}$  – суммарный вектор сил; уравнение переноса количества движения (7); уравнение неразрывности потока для несжимаемой жидкости (8).

В случае решения осесимметричной задачи в двумерной постановке уравнение Навье-Стокса в цилиндрической системе координат примет вид

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial r} - \frac{\vec{v}}{r^2} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2} + \frac{F_{\text{эм}}}{\eta}. \quad (9)$$

Расчёт поля скоростей проводился в два этапа. На первом этапе вязкость  $\eta_1$  принималась постоянной. На втором этапе вязкость материала  $\eta$  уточняется по критической скорости  $V_{\text{крит}}$  согласно уравнению

$$\eta = \eta_1 \times \left(1 + \frac{V}{V_{\text{крит}}}\right). \quad (10)$$

**В третьей главе** приведены исследования плоской линейной индукционной машины с восемнадцатью пазами (ПЛИМ-18), лабораторной цилиндрической индукционной машины и промышленного электромагнитного перемешивателя с кристаллизатором скольжения.

На рис. 2 а приведены сравнения зависимости распределений нормальной составляющей магнитной индукции ( $B_n$ ) по длине магнитопровода  $x$  ПЛИМ-18 на разных расстояниях от его поверхности, полученные расчётным путем и экспериментально. На рис. 2 б приведены среднеквадратичные значения ( $B_{срк}$ ) нормальной составляющей магнитной индукции, показывающие хорошую сходимость расчётных и экспериментальных зависимостей.

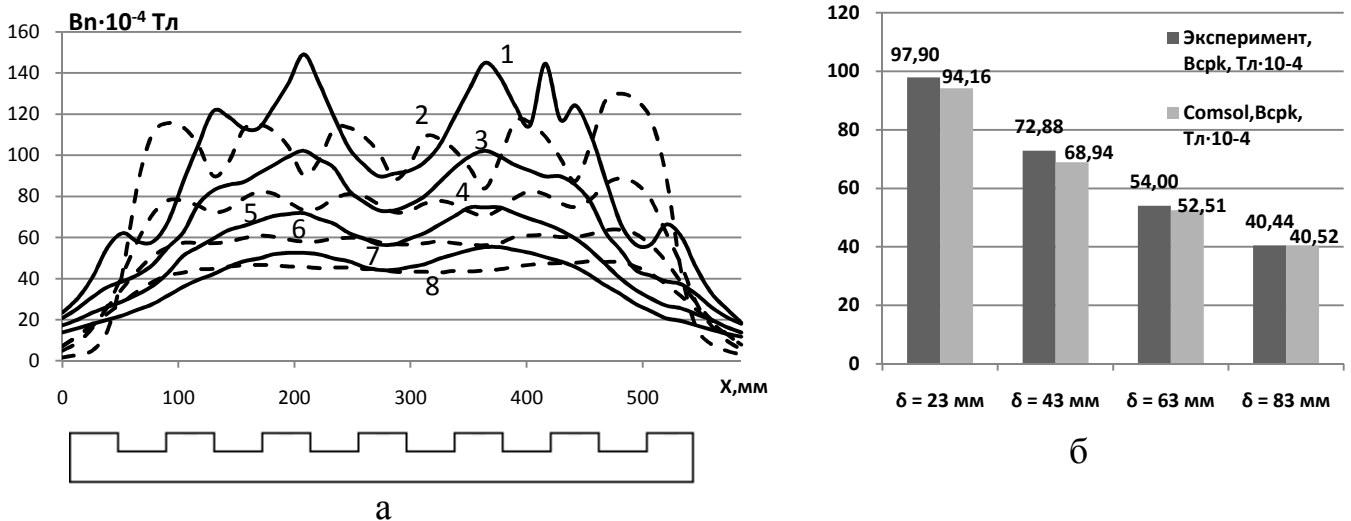


Рис. 2: а - сравнения распределений  $B_n$ : 1,2- $\delta=23$  мм; 3,4- $\delta=43$  мм; 5,6- $\delta=63$  мм; 7,8- $\delta=83$  мм; четные номера –эксперимент; нечетные – расчёт; б - сравнения  $B_{срк}$ .

На следующем этапе исследовалась лабораторная модель цилиндрической линейной машины с шестью пазами (ЦЛИМ-6). Исследования проводились на холостом ходу и с введенным в рабочую зону ЦЛИМ-6 цилиндром, имитирующим гильзу кристаллизатора.

На основании проведенных расчётов было проанализировано влияние расстояния от поверхности магнитопровода, частоты питающей сети, схемы соединения обмоток, изменений конструкции устройства ЭМП на распределение  $B_n$ .

В промышленности применяются литейные установки, оснащенные кристаллизаторами с толщиной стенки медной гильзы до 20 мм, что в значительной мере снижает интенсивность электромагнитного воздействия на кристаллизующийся металл при использовании электромагнитного перемешивателя.

Приведены расчетные распределения  $B_n$  и сравнения их средних и среднеквадратичных значений в зависимости от электрофизических свойств материалов (рис. 3) и толщины стенки (рис. 4) введенных цилиндров.

Уменьшение толщины стенки кристаллизатора создает положительный эффект благодаря снижению её экранирующего эффекта. Однако, при этом необходимо учитывать изменения электрофизических и теплофизических свойств материала кристаллизатора, а также снижение его механической прочности. На основании проведенных исследований рекомендуется в качестве материала гильзы кристаллизатора для промышленных установок сплав БрАЖМц, с толщиной стенки до 10 мм.



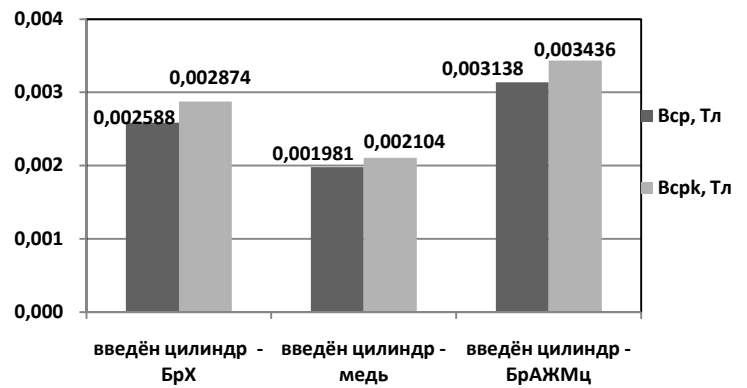
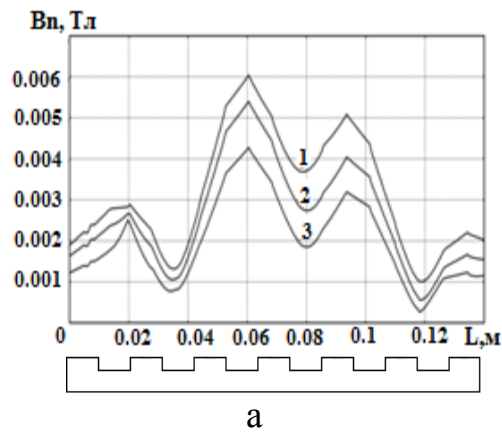


Рис.3: а- расчетные распределения  $B_n$ : 1 – материал цилиндра бронза - БрАЖМц , 2 –материал цилиндра бронза - БрХ, 3 – материал цилиндра медь;  
б - сравнение  $V_{sr}$  и  $V_{srk}$ .

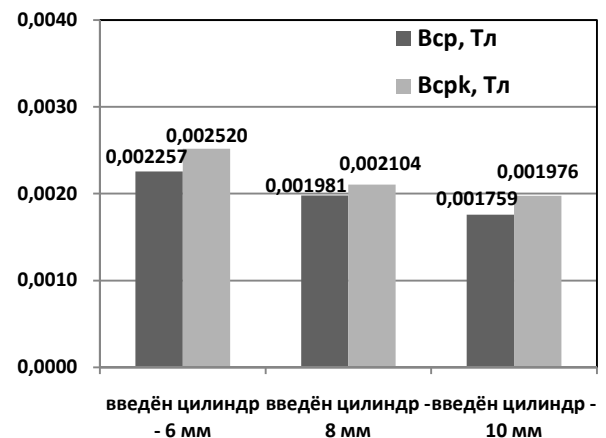
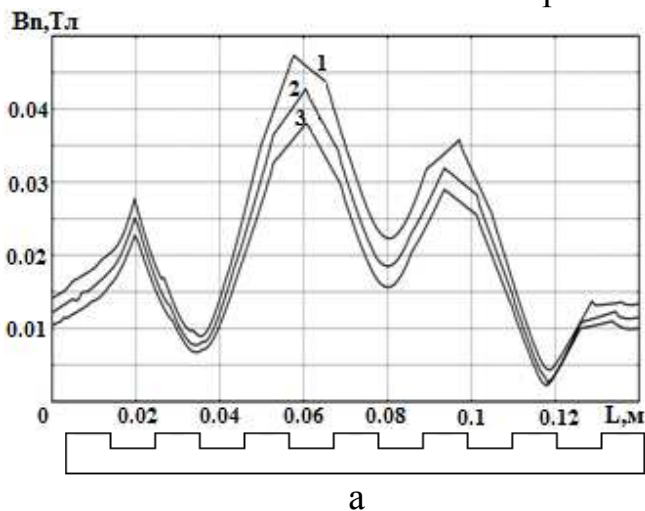


Рис. 4: а - распределения  $B_n$ : 1–толщина стенки цилиндра – 6 мм; 2 – 8 мм; 3 – 10 мм.  
б - сравнение  $V_{sr}$  и  $V_{srk}$ .

Одним из способов изменения распределения магнитной индукции по радиусу является изменение частоты питающей сети. На рис. 5 приведены сравнения распределений, средних  $V_{sr}$  и среднеквадратичных  $V_{srk}$  нормальной составляющей магнитной индукции при  $\delta = 21$  при разных частотах.

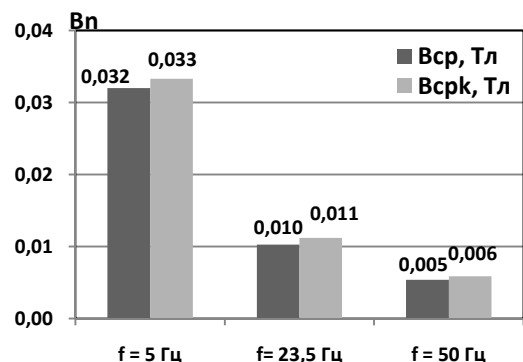
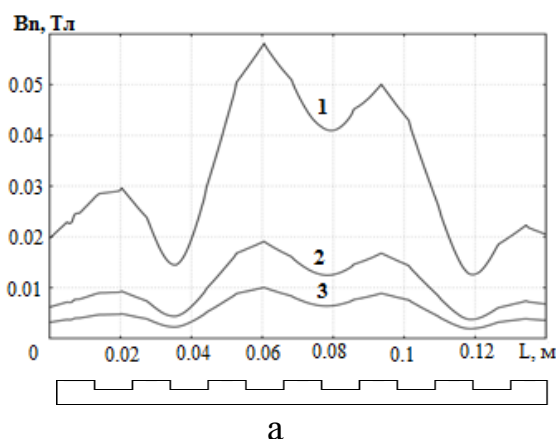


Рис. 5: а - распределения  $B_n$  при разных частотах:  
1 –  $f = 5$  Гц, 2 –  $f = 25$  Гц, 3 –  $f = 50$  Гц; б - сравнение  $V_{sr}$  и  $V_{srk}$ .

На основании результатов расчёта можно рекомендовать переходить на пониженную частоту при использовании электромагнитных перемешивателей относительно большого диаметра.

На рис.6 приведены сравнения расчетных и экспериментальных распределений и среднеквадратичных значений  $B_{срк}$  нормальной составляющей магнитной индукции при разных схемах включения.

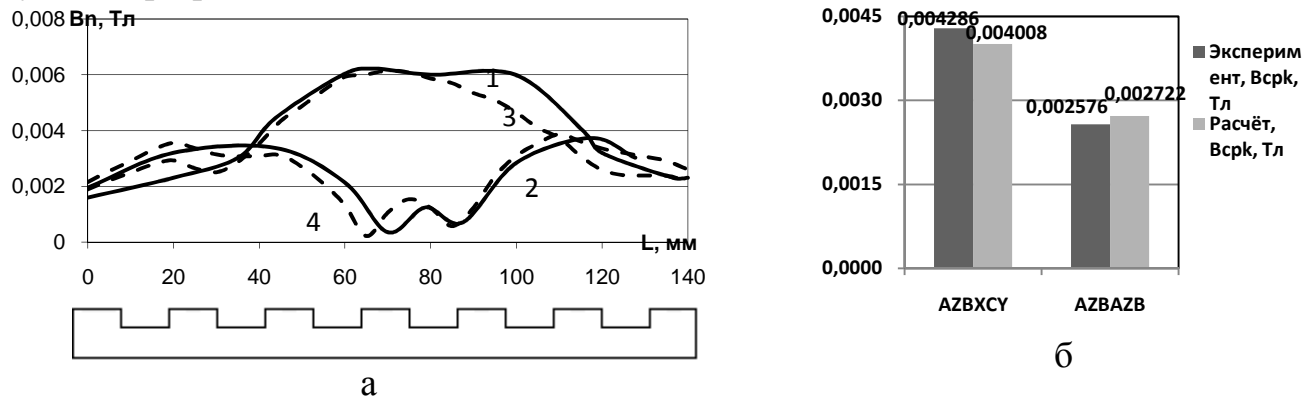


Рис.6: а - сравнения распределений  $B_n$  ( $\delta = 21$  мм): 1,2 – эксперимент; 3,4 – расчёт; 1,3 – схема – AZBXCY; 2,4 – AZBAZB;

б – сравнение расчётных и экспериментальных  $B_{срк}$ .

Расчетные и экспериментальные зависимости индукции имеют практически одинаковый вид и близки по абсолютным значениям. Помимо этого важно отметить, что при одинаковых значениях усредненной линейной нагрузки на поверхности магнитопровода и на одном уровне измерения, а также при  $q = 1$ , величины  $B_{ср}$  и  $B_{срк}$ , для приведённых схем, различаются до 40%. Поэтому, при разработке промышленных электромагнитных перемешивателей необходимо учитывать порядок чередования фаз по пазам.

На кафедре ЭЭТС при участии автора была создана компьютерная модель, позволяющая проводить связанные тепловой, электромагнитный и гидродинамический расчёты многослойной системы «магнитопровод – кристаллизатор – твердая фаза металла – жидкая фаза металла», в приложении к реальным промышленным условиям. Такая модель позволяет рассчитывать составляющие магнитного поля, распределение скоростей (в продольном сечении), возникающих в жидкой фазе кристаллизующегося слитка, распределение температуры, а также учитывать количество энергии, выделяемой при переходе металла из жидкого в твердое состояние.

При формировании данной модели задавались размеры, свойства и параметры промышленного электромагнитного перемешивателя. Расчёты производились для трёх режимов: 1) «холостой ход»; 2) введен кристаллизатор в сборе (корпус кристаллизатора, водяная рубашка, гильза кристаллизатора); 3) рабочий режим.

При расчёте режимов 1 и 2, как и в случае с ЦЛИМ-6, решалась осесимметричная задача в двумерной постановке в цилиндрической системе координат. Производился анализ влияния расстояния от поверхности магнитопровода, частоты питающей сети, изменения конструкции устройства ЭМП, а также изменение направления электромагнитного поля на распределение нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции.

На рис. 7 приведены сравнения расчётных и экспериментальных распределений нормальной  $B_n$  и тангенциальной  $B_t$  составляющих магнитной индукции.

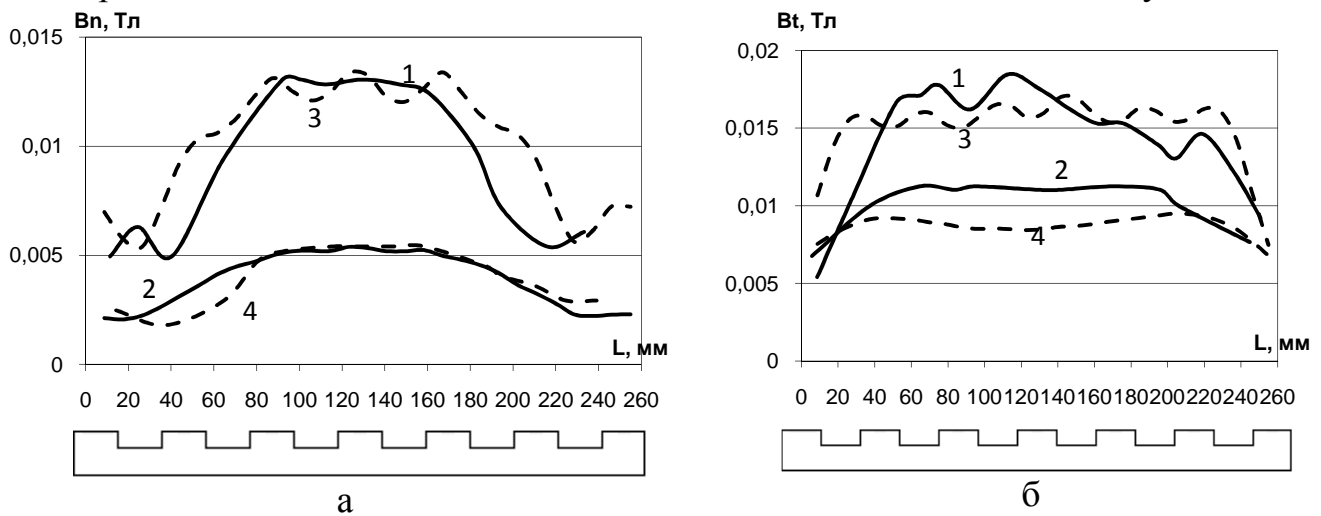


Рис. 7. Сравнения расчётных и экспериментальных распределений магнитной индукции 1,2 – эксперимент; 3,4 – расчёт; 1,3 –  $\delta = 27,5$  мм; 2,4 –  $\delta = 66$  мм:

а -  $B_n$ ; б -  $B_t$ .

В табл.1 приведены сравнения результатов расчётов промышленного электромагнитного перемешивателя, методами ДСЗ и МКР в пакете MathCad с результатами расчётов в Comsol Multiphysics и экспериментальными данными.

Таблица 1

Значения максимальных индукций, Тл		Расчет ДСЗ 14 слойная/ 25 слойная	Расчет МКР	Расчёт Comsol	Экспе- римент
$B_n$	$\delta = 27,5$ мм	0,014/0.017	0.016	0.01325	0,01305
	$\delta = 66$ мм	0,008/0.007	0.06	0.00538	0,0054
$B_t$	$\delta = 27,5$ мм	0,019/0.021	0.022	0.017	0,01845
	$\delta = 66$ мм	0,011/0.0115	0.0115	0.00946	0,01125

Так же как и при расчёте ЦЛИМ-6 экспериментальные и расчётные распределения индукции в режиме «холостого хода» показали достаточно хорошую сходимость.

Влияние электропроводности материала кристаллизатора на распределение индукции в рабочей зоне проводилось путем расчётов индукций  $B_n$  и  $B_t$  с кристаллизаторами из меди и из сплава БрАЖМц. Толщина стенки кристаллизатора – 10 мм. При расчетах, так же как и в экспериментальных исследованиях, была использована укороченная медная рубашка, что отразилось характерными всплесками на графиках расчётных и экспериментальных распределений индукции (рис. 8).

Сравнения расчётных и экспериментальных среднеквадратичных значений  $B_n$  и  $B_t$  показали достаточно хорошую сходимость. Использование кристаллизатора с медной гильзой приводит к уменьшению, по сравнению с режимом «холостого хода», соответствующих среднеквадратичных значений индукции на 58,1 % и 60,5 %, а из сплава БрАЖМц на 0,5% и 17,3%. Рекомендации по применению сплава

БрАЖМц для изготовления гильзы кристаллизации, были использованы в промышленных условиях.

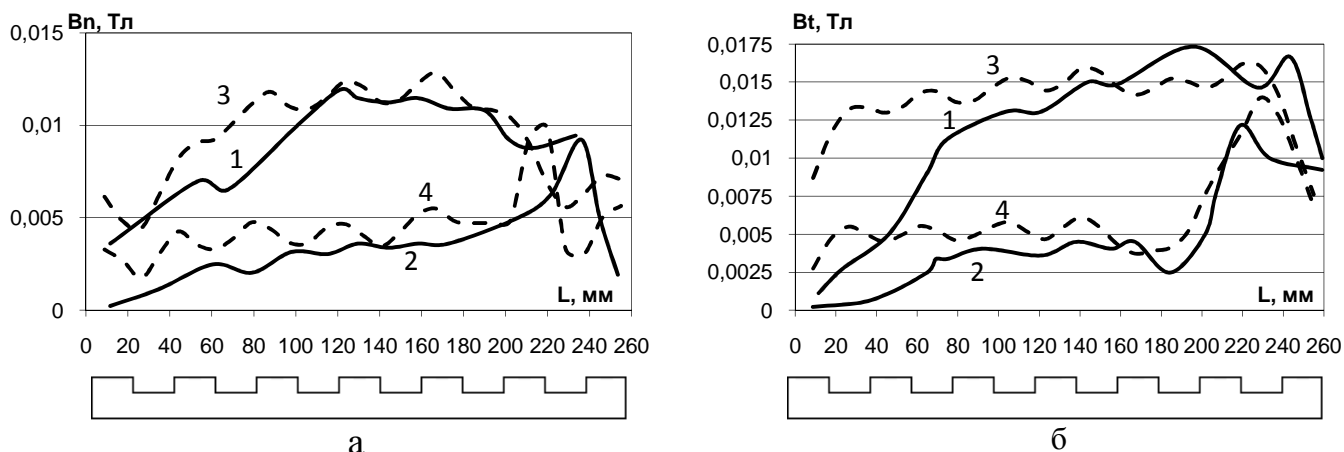


Рис.8. Сравнения расчётных и экспериментальных распределений магнитной индукции: 1,2 - эксперимент; 3,4 - расчёт; 1,3 - гильза кристаллизатора из сплава БрАЖМц; 2,4 – гильза кристаллизатора из меди. а -  $B_n$ ; б -  $B_t$ .

На рис. 9 приведены распределения  $B_n$  на двух уровнях измерения и при разных направлениях электромагнитного поля относительно направления вытягивания слитка. Направление поля от верхнего зубца к нижнему (поле «вниз») соответствует направлению вытягивания слитка (рис. 10). Изменение  $B_n$  (рис. 9) при изменении направления электромагнитного поля незначительно, однако, как показали расчёты рабочего режима промышленного электромагнитного перемешивателя и его экспериментальные исследования, направление электромагнитного поля оказывает существенное влияние как на распределение скоростей в жидком металле (рис. 11-13), так и на структуру кристаллизующегося слитка (рис. 15).

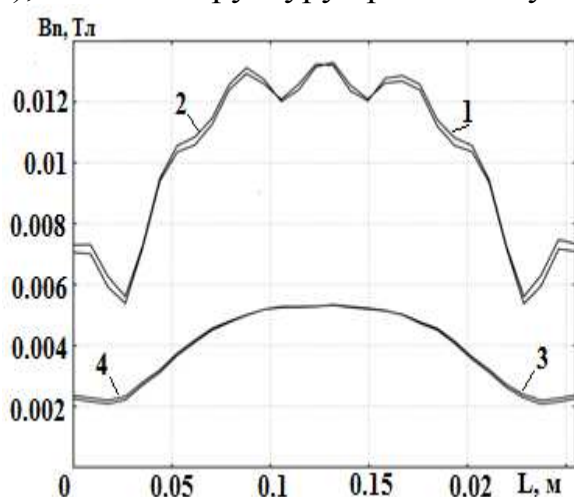


Рис.9. Распределения  $B_n$ :  
1,2 – 27,5 мм; 3,4 – 66 мм;  
1,3 – поле вниз; 2,4 – поле вверх

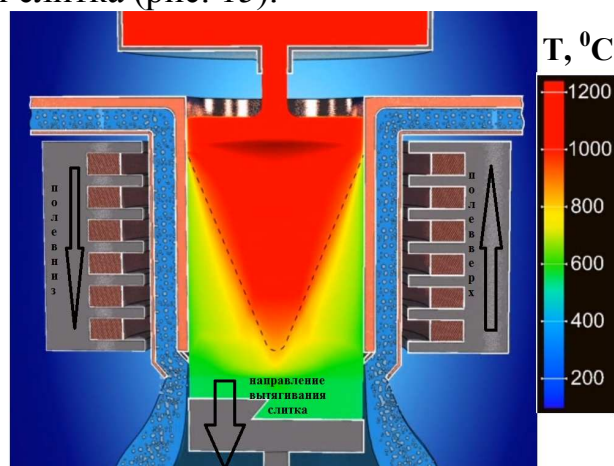


Рис.10. Эскиз разливочного узла литейной установки с кристаллизатором скольжения, оснащённым электромагнитным перемешивателем.

В промышленных условиях каждому диаметру отливаемого слитка соответствует свой кристаллизатор. При использовании устройств ЭМВ на кристаллизующийся металл при отливке слитков в кристаллизатор скольжения необходимо созда-

вать новое устройство ЭМП, соответствующее типо-размеру кристаллизатора. Это не всегда возможно и экономически оправданно. В связи с этим, проводились разработка и исследования универсального электромагнитного перемешивателя, позволяющего осуществлять переход от исходного диаметра к меньшему диаметру слитка, производя небольшие конструктивные изменения.

Результаты сравнения характеристик электромагнитного перемешивателя для различных слитков с использованием индукторов с одинаковыми обмотками и одинаковыми внешними, но различными внутренними диаметрами приведены в табл. 2, где рассмотрены следующие варианты (схема AAZZBB, кристаллизатор медный): 1) слиток 248 мм; 2) слиток 190 мм с зазором между индуктором и корпусом кристаллизатора; 3) вариант 2 без зазора; 4) вариант 3 с полукруглыми пазами индуктора.

Таблица 2

Вариант	Усилие осевое суммарное, Н	Усилие осевое на металл, Н	Мощность	
			Активная, кВт	Реактивная, квар
1	349,6	15,9	12,8	70,6
2	291	12,6	10,2	110,1
3	309,6	13,9	10,7	115,7
4	337,3	15,7	10,7	143,6

Как следует из рассмотрения данных табл. 2, применение того же индуктора, но с более глубокими пазами (для литья слитка диаметром 190 мм) позволяет при тех же токовых нагрузках обеспечить практически такие же осевые усилия в металле, что и в исходной конструкции (для слитка диаметром 248 мм).

Результаты расчетов, проведенных в Comsol Multiphysics, достаточно близки по значениям с результатами расчётов, произведённых в других пакетах, а также с результатами экспериментальных исследований. Это подтверждает корректность расчетной электромагнитной модели и дает возможность перейти к расчёту модели, позволяющей проводить связанные тепловой, электромагнитный и гидродинамический расчёты в рабочей зоне электромагнитного перемешивателя.

На рис. 11 приведены результаты расчёта распределения температурного поля и поля скоростей. На рис. 12 а, б представлено распределения скоростей в жидком металле при разных направлениях электромагнитного поля. На рис. 13 представлено сравнение распределений скорости вдоль затвердевающей корочки кристаллизующегося металла при разных направлениях электромагнитного поля. Как отмечалось ранее, изменение направления электромагнитного поля приводит к незначительному изменению распределения  $V_n$  (рис. 9). Однако, анализируя рис 12 - 13, можно видеть, что направление электромагнитного поля оказывает существенное влияние на кристаллизующийся слиток. Это подтверждается экспериментальными исследованиями макроструктур слитка бескислородной меди (рис. 14 а, б).

С целью повышения коэффициента мощности проводились исследования способов компенсации реактивной мощности в электромагнитных перемешивателях. В частности, рассматривался электромагнитный перемешиватель с образованием двух параллельных ветвей в фазе исходной конструкции.

Индуктор электромагнитного перемешивателя питается от симметричной системы фазных напряжений. В табл. 3 приведены результаты расчета основных показателей электромагнитного перемешивателя для различных вариантов компенсации его реактивной мощности при одинаковой плотности тока в обмотке индуктора (его одинаковом нагреве).

Рассмотрены «базовые» варианты питания некомпенсированного электромагнитного перемешивателя от источников тока или напряжения (табл. 3, две первые строки). В числителе показано усилие, действующее на стенку кристаллизатора и металл, в знаменателе - усилие, действующее только на металл. Как и следовало ожидать, питание индуктора симметричной системой токов дает лучшие показатели. Организация параллельных ветвей в фазах ухудшает показатели электромагнитного перемешивателя (третий вариант), поскольку токи в ветвях приобретают фазовый сдвиг. Включение емкостей в компенсационные ветви-фазы и изменение начал и концов этих ветвей местами дает наилучшие результаты (четвертый вариант). Усилие, действующее на металл, увеличивается в 1.06 раза по сравнению с базовым вариантом 1 и в 1.18 раза по сравнению с вариантом 3. При питании обмотки компенсированного индуктора токами 50 Гц (варианты 5 и 6) внутренняя компенсация рассматриваемым способом позволяет увеличить усилие на металл в 1.1 раза (5-й вариант по сравнению с 6-м).

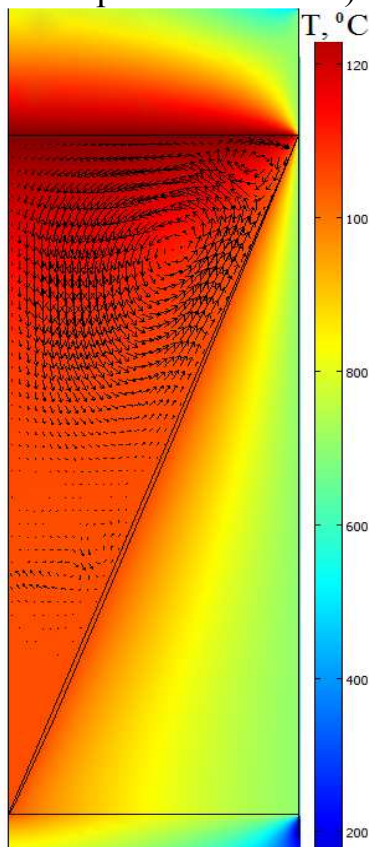


Рис. 11. Распределения температурного поля и поля скоростей: схема соединения – AZBXCY, поле «вниз», частота 50 Гц.

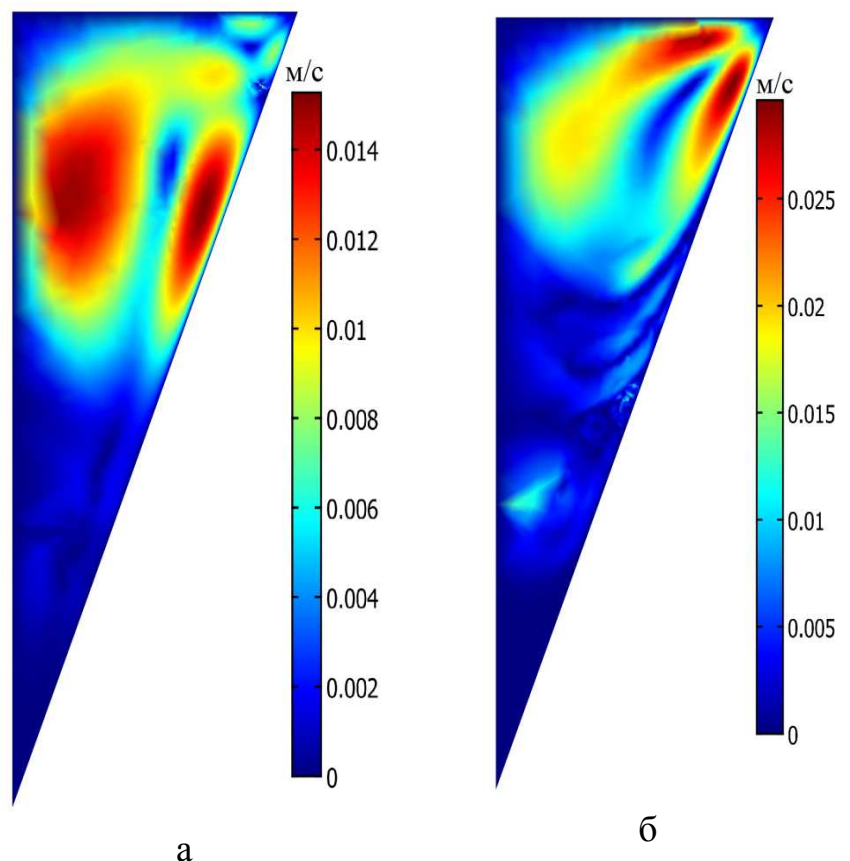


Рис. 12. Распределения скоростей: схема соединения – AZBXCY, поле «вниз», частота 50 Гц: а - поле «вниз»; б - поле «вверх».



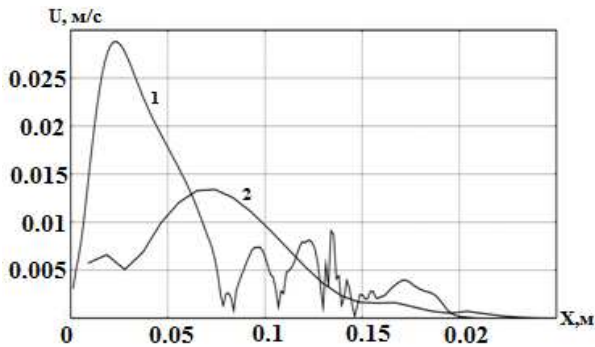


Рис. 13. Распределения скорости вдоль за-  
твердевающей корочки кристаллизующе-  
го металла: 1 – направление электро-  
магнитного поля - «вверх»; 2 - «вниз».

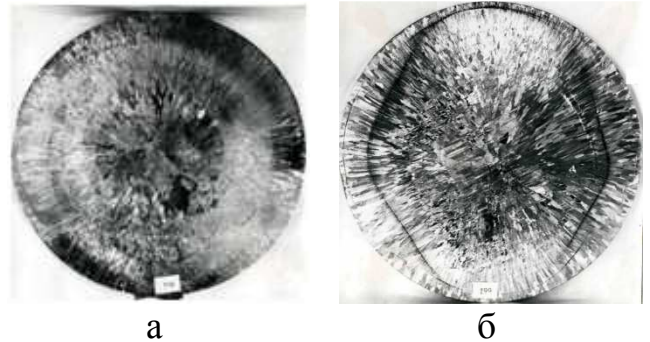


Рис. 14.Макроструктура поперечного  
темплета слитка Ø200 мм  
из бескислородной меди:  
а - поле «вниз»; б - поле «вверх»;

Таблица 3

	Плот- ность тока, А/мм <sup>2</sup>	Тяговое усилие, Н	Мощность, кВА	cos φ	Требуе- мая ем- кость, Ф	Напря- жение фазы, В
Последовательное соединение секций без С, 5 Гц, q = 2, пи- тание от источника напряжения	3.6	710/50.7	2.954 + j 9.025	0.311	0.031	96
Последовательное соединение секций без С, 5 Гц, q = 2, от источника тока	3.6	713/51.4	2.999 + j 9.07	0.314	0.032	95.7
Без С в компенса- ционной обмотке (КО), 5 Гц, q= 1	3.6	612/44.5	2.846 + j 8.434	0.32	0.127	46
При наличии С в КО, 5 Гц, q = 1	3.6	773/53.8	3.037 – j 0.034	1	0.033	50
При наличии С в КО, 50 Гц, q = 1, U <sub>p</sub> = 68	3.7	641/18.0	9.996+ j 0.944	0.996	0.00043	400
Без С в КО, q = 1, 50 Гц, U <sub>p</sub> = 68	3.7	528/16.4	9.141+ j 76.75	0.118	0.001692	380

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследова-  
ний на физических моделях плоской линейной машины (ПЛИМ-18) и цилиндриче-  
ских линейных машин.

Исследовался плоский линейный индукционный модуль с восемнадцатью па-  
зами, созданный на кафедре ЭЭТС для проведения экспериментальных работ по ис-  
следованию характеристик и параметров плоской линейной индукционной машины  
в режиме холостого хода. Модель состоит из магнитопровода, выполненного в фор-  
ме прямоугольного параллелепипеда и 18 катушек, намотанных через ярмо (спинку)  
магнитопровода. Длина магнитопровода ПЛИМ-18 –  $L = 475$  мм, ширина магни-

топровода –  $b = 140$  мм, высота магнитопровода –  $h = 85$  мм, зубцовый шаг –  $t_3 = 26$  мм, число витков в пазу –  $N = 225$ .

Физические модели цилиндрических линейных машин состоят из модулей – магнитопроводов с пазами, обращенными к рабочему объему. Число пазов – 6. Длина магнитопровода – 112,5 мм, ширина – 58,3 мм, высота – 70 мм, зубцовый шаг – 17,5 мм.

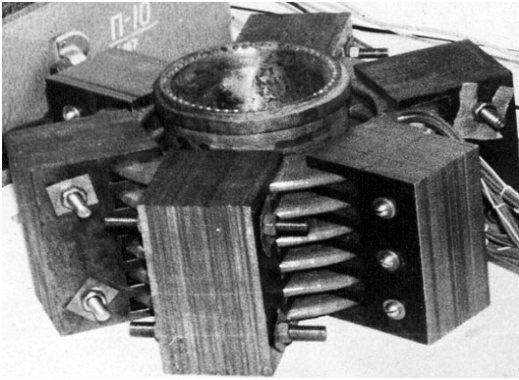


Рис.15. Физическая модель ЦЛИМ-6 с гильзой кристаллизатора.

В результате экспериментальных исследований цилиндрической линейной машины с шестью пазами (ЦЛИМ-6) были получены: распределения магнитных потоков в зубцах магнитопроводов и в спинке магнитопроводов между зубцами при разных схемах; распределения нормальной составляющей индукции вдоль модуля магнитопровода  $B_n^*(L)$ : при различных схемах включения катушек обмотки (рис. 16); при различных линейных нагрузках на поверхности магнитопровода в режиме «холостого хода» и в режиме нагрузки (рис. 17).

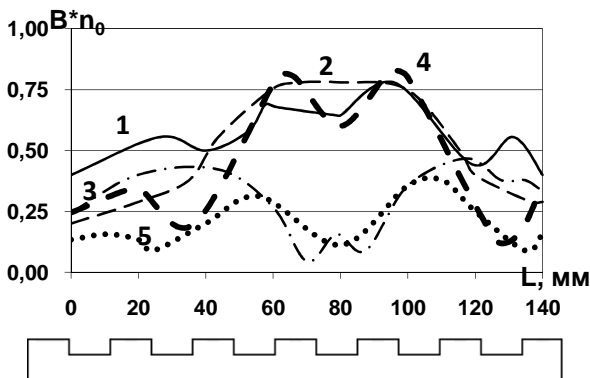


Рис. 16. Распределения  $B_n^*(L)$ : 1 – AAZZBB, 2 – AZBXCY, 3 – AZBAZB, 4 – AABVCC, 5 – ABCABC;  $\delta = 21$  мм;

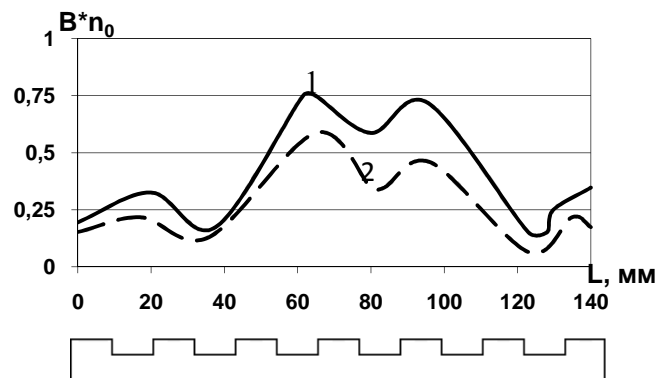


Рис. 17. Распределения  $B_n^*(L)$ : 1 – «холостой ход», 2 – режим нагрузки;  $\delta = 21$  мм; AABVCC;  $A = 0,154 \cdot 10^5$  А/м;

Проведенные экспериментальные исследования ПЛИМ-18 и ЦЛИМ-6 доказали достоверность расчётов, проведенных в пакете Comsol Multiphysics (сравнение результатов исследований приведено в гл. 3).

Схемы соединения катушек обмотки AAZZBB, AZBXCY, AABVCC рекомендуются как наиболее эффективные применительно к устройствам ЭМП жидких металлов и сплавов.

Выявлено, что гильза кристаллизатора оказывает существенное влияние на величину индукции в рабочем объеме. Поэтому, рекомендуется при проектировании электромагнитных перемешивателей совместно с кристаллизатором выбирать в качестве материала кристаллизатора сплавы с большим удельным электрическим сопротивлением.



**В пятой главе** приводятся результаты промышленных испытаний электромагнитных перемешивателей, предназначенных для воздействия на жидкую фазу кристаллизующегося слитка сплавов на основе меди, а также описание электромагнитного перемешивателя для специальных сплавов в закрытом объеме (реторте). На рис. 18 представлена фотография промышленного электромагнитного перемешивателя, используемого для получения специальных сплавов в условиях ОАО «Уралэлемент».

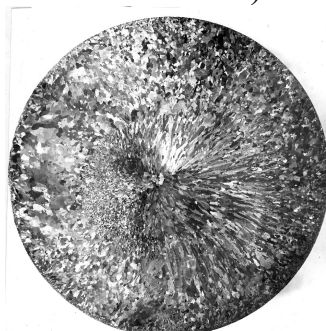
Приводятся металлографические исследования, проведенные в заводских лабораториях. Представлены макро- и микроструктуры исследуемых металлов и сплавов. На рис. 19 показаны макроструктуры поперечных темплетов слитка диаметром 200 мм из сплава БрБ-2.

Сравнение фотографий макроструктур слитков, отлитых с ЭМП и без него, показывает, что ЭМП оказывает значительное влияние на структурообразование литого металла. При металлографическом исследовании было отмечено, что применение ЭМП в процессе кристаллизации сплава БрБ-2 позволило получить литую мелкозернистую структуру (условный средний размер зерна 0,04 – 0,048 мм).

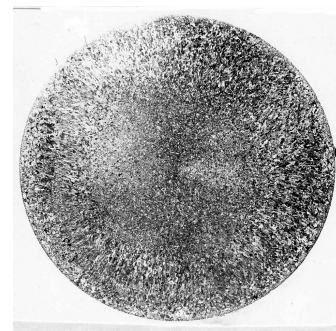
Слиток, темплет которого изображен на рис. 20 б, был получен с применением третьего варианта промышленного электромагнитного перемешивателя (ЦЛИМ-ПЗ, поле «вниз», схема – AZBXCY,  $A = 164 \cdot 10^5$  А/м).



Рис. 18. Электромагнитный перемешиватель для специальных сплавов



а



б

Рис. 19. Макроструктуры поперечных темплетов слитка Ø 200 мм из сплава БрБ-2:

а – без ЭМП; б – с применением ЭМП.

Результаты механических испытаний литого металла показали, что использование электромагнитного перемешивания приводит к увеличению относительного удлинения (более 30%), которое обеспечивает лучшее «поведение металла» при дальнейшей пластической деформации.

Использование электромагнитного перемешивателя при отливке слитков Ø 200 мм из оловянной и кремнистомарганцевой бронзы позволяет сократить зону столбчатых кристаллов в отливаемых слитках на 51,8% (AAZZBV, поле «вверх»,  $Bn_0 = 59,2 \cdot 10^{-3}$  Тл) и на 11,2% (AAZZBV, поле «вверх»,  $Bn_0 = 118,3 \cdot 10^{-3}$  Тл).

В табл. 4 приведены распределения неметаллических включений по радиусу слитков оловянной и кремнистомарганцевой бронзы Ø 200 мм.

Таблица 4.

Сплав	Режим	периферия	0,5R	R
Оловянная бронза	Без ЭМП	0,096%	0,11%	0,11%
Оловянная бронза	AAZZBB, поле «вверх», $Bn_0 = 59,2 \cdot 10^{-3}$ Тл	0,024%	0,024%	0,024%
Кремнистомарганцевая бронза	Без ЭМП	0,36%	0,38%	0,35%
Кремнистомарганцевая бронза	AAZZBB, поле «вверх», $Bn_0 = 59,2 \cdot 10^{-3}$ Тл	0,024%	0,027%	0,026%

При анализе прутков, полученных из слитков бескислородной меди, отлитых с применением ЭМП при направлении электромагнитного поля «вверх», не обнаружено дефектов типа МТР (межкристаллические трещины), которые часто встречаются при отливке по заводской технологии.

Таким образом, в случае, когда устройство ЭМП работает в оптимальном для конкретного металла или сплава режиме, можно получить необходимые характеристики литого металла, что, как следствие, положительно сказывается на качестве готовых изделий.

**В приложениях** приводятся документы о внедрении, результаты расчётов и экспериментальных исследований.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На базе пакета Comsol Multiphysics разработана универсальная компьютерная модель, позволяющая исследовать электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы в рабочей зоне электромагнитного перемешивателя расплавов.

2. На основании аналитических и экспериментальных исследований электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в рабочей зоне промышленного электромагнитного перемешивателя установлено влияние на его характеристики частоты питающей сети, схемы соединения обмоток и конструктивных факторов. Схемы соединения катушек обмотки AAZZBB, AZBXCY, AABVCC являются наиболее эффективными применительно к устройствам ЭМП жидких металлов и сплавов.

3. Установлено, что для создания сосредоточенного интенсивного движения в области начальной фазы кристаллизации медного слитка Ø200 мм целесообразно использовать схему соединения катушек обмотки AZBXCY, направление поля «вверх». При использовании электромагнитного перемешивателя при отливке слитков Ø 200 мм из оловянной и кремнистомарганцевой бронзы рекомендуется использовать схему AAZZBB, направление поля «вверх». Гильзу кристаллизатора для промышленных установок рекомендуется выполнять с толщиной стенки до 10 мм из сплава БрАЖМц. При использовании электромагнитных перемешивателей относительно большого диаметра (300 – 400 мм) рекомендуется переходить на пониженную частоту 25 Гц.

4. Предложен и исследован универсальный электромагнитный перемешиватель, позволяющий осуществлять переход от исходного диаметра к меньшему диаметру. Показана возможность использования устройства в предлагаемой конфигурации, приведены его характеристики.

5. Предложена схема внутренней компенсации реактивной мощности. Показано, что емкости, необходимые для компенсации реактивной мощности, уменьшаются по сравнению с вариантом классической схемы. Усилие, действующее на металл, увеличивается в 1,06 раза по сравнению с базовым вариантом. При питании обмотки компенсированного индуктора токами 50 Гц внутренняя компенсация рассматриваемым способом позволяет увеличить усилие на металл в 1,1 раза.

6. Сравнение результатов экспериментальных исследований на физических моделях и промышленных образцах электромагнитных перемешивателей с результатами аналитических исследований подтверждает достоверность полученных расчетных данных, а также показывает, что принятые допущения приемлемы для получения достаточной в инженерной практике точности расчётов. В результате металлографических исследований показано, что выбранные в соответствии с п.2 конструкции и режимы работы электромагнитного перемешивателя ведут к улучшению макро- и микроструктур слитков. В частности, применение ЭМП в процессе кристаллизации сплава БрБ-2 позволило получить литую мелкозернистую структуру (условный средний размер зерна 0,04 – 0,048 мм).

Результаты исследований были переданы и внедрены в ОАО «Уралэлемент» (Челябинская область, г. Верхний Уфалей), используются при создании процесса ЭМП сплавов МН0,6, МН2, МН6, МН10, МН18, МН19 в изложнице на предприятии ООО «Производственное объединение высокоточных сплавов и лигатур» (Курганская область, г. Далматово), а также применяются в учебном процессе и научных исследованиях кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ.

Автор выражает благодарность доценту Сарапулову С.Ф. за помощь в подготовке материалов и написании диссертационной работы.

**Основное содержание** диссертации опубликовано в следующих работах:

1. **Воздействие электромагнитного поля на расплав в процессе его кристаллизации / С.А. Бычков, Б.А. Сокунов, Н.Г. Батов. // Вестник МЭИ. - 2010. - №2. С. 67-71.**
2. **Применение устройств электромагнитного перемешивания при отливке слитков на основе меди / С.А. Бычков. // «Промышленная энергетика», №5, 2010. - С.25-28.**
3. **Регулирование наполнения сталеразливочных ковшей при помощи индукционной машины / С.А. Бычков, Б.А. Сокунов, Л.А. Зайнуллин.// Промышленная энергетика», №5, 2010. - С.28-31.**
4. **Характеристики цилиндрического электромагнитного перемешивателя расплавов при литье медных и алюминиевых слитков/ Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, Б.А. Сокунов, С.А. Бычков// Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференция с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011». Екатеринбург. 2011. С.125-130.**
5. **Компенсация реактивной мощности в линейных индукционных машинах технологического назначения/ С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, Б.А. Сокунов,**

В.Э.Фризен, **С.А. Бычков**, А.А. Идиятулин. //Труды 9-й научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург. 2010. С.98-101.

6. Исследование физической модели индукционного устройства, предназначенного для электромагнитного перемешивания расплава в процессе кристаллизации/ **С.А. Бычков**// Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации.» Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. Часть 3. С.205-207.

7. Специальные электротехнологические установки/ **С.А. Бычков**, Б.А. Сокунов// Материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2009». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. С.261-266.

8. Электротехнологические установки специального назначения для металлургии/ **С.А. Бычков**, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарапулов// Труды 8-й научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург. 2008. С.75-78.

9. Исследование модели устройства, предназначенного для электромагнитного перемешивания расплавов/ **С.А. Бычков**, Б.А. Сокунов, С.Е. Миронов// Труды 7-й научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург. 2007. С.82-85.

10. Индукционное устройство электромагнитного воздействия на кристаллизующийся слиток/ **С.А. Бычков**, Б.А. Сокунов// Труды III Международной НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург. 2007. С.309-315.

11. Электромагнитное перемешивание при кристаллизации жидкой фазы слитка как один из способов снижения энергозатрат/ **С.А. Бычков**, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарапулов, В.Э. Фризен// Сборник материалов «Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых». Екатеринбург. 2006. С.41-44.

12. Индукционные электротехнологические устройства/ **С.А. Бычков**, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарапулов//Сборник докладов конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологий». Иваново. 2006. С.161-163.